

中国古桥学



第二期

北京茅以升科技教育基金会
中国古桥研究和保护委员会

2018. 02

赵州桥：中国古建筑最璀璨明珠，世界第一古桥

郑凯锋 西南交通大学教授、博士生导师

茅以升先生在 1962 年 3 月 4 日《人民日报》上发表《中国的石拱桥》一文；后来小学三年级语文课文《赵州桥》根据该文改编：“河北省赵县的洨河上，有一座世界闻名的石拱桥，叫安济桥，又叫赵州桥。它是隋朝的石匠李春设计和参加建造的，到现在已经有一千四百多年了……”。茅老这篇文章让数以亿计的小学生了解了赵州桥，也对中国古桥和桥梁建造产生浓厚兴趣……

一、世界拱桥跨度纪录保持 541 年

位于河北省赵县洨河上的赵州桥，原名安济桥，建于隋朝年间公元 595 年~605 年，建成至今已有 1414 年。

桥梁长度 50.82m，中部宽度 9m，拱脚宽度 9.6m，桥面宽敞、平缓，极显自然、协调和大气。

桥梁主拱为跨度 37.02 m 的圆弧拱；矢高 7.23 m，矢跨比 1:5.12，即 0.195，小于 0.25，属于坦拱桥。对于坦拱结构，相同的自重和桥上负荷在拱脚要产生更大的向外水平推力，所以建造难度更大；但坦拱桥的行人车马无需过多爬高，便于通行。

主拱圈上两侧各建造两个大小拱(净跨为 3.8 m 和 2.8 m)支承桥面，这是世界上第一次建造空腹式(敞肩式)拱桥。其突出优点有三：第一，大幅度省材、减重；第二，增加过水面积，减小高水位时流水对桥梁的冲击压力；第三，通透、轻巧和美观。

赵州桥 37.02 m 的跨度在那个年代是拱桥的世界记录，一直保持了 541 年：1147 年，土耳其东南部建成跨越巴特曼河 38.71m 跨度的马拉巴迪桥(Malabadi Bridge)。

赵州桥的跨度大，建造技术高超，总体造型优美，使用时间超长，维护维修到位，是中国古建筑最璀璨的明珠，是世界第一古桥。



图 1 公元 605 年建成跨度 37.02m 的赵州桥



图2 公元 1147 年建成跨度 38.71m 的土耳其马拉巴迪桥



图3 宽敞平缓的桥面

二、牢固的拱圈和拱圈基础

赵州桥的石料采用附近产的青白色石灰岩，抗压强度为 50~100MPa；主拱圈在拱脚的厚度 1.34m，包含两层。

下层拱圈厚度全部为 1.02m，由 28 条平均宽度约 0.32m 的拱券并列组成，外侧拱券共有 41 块长度约 1m 的倒梯形块石，两两间用两块(拱顶用 3 块)腰铁联结。

上层拱圈(曾称为护拱石)厚度从拱脚的 0.30m 渐变到拱顶的 0.16m，其块石纵向接缝与下层拱券块石接缝错开，上层拱圈(含 6 道钩石)及小拱支墩的块石错列布置。

主拱圈和其它部位的块石之间不用灰浆，而是镌刻有斜纹的块石表面直接贴合；块石表面上镌刻有斜纹是为了增加贴合面间的摩擦力。不用灰浆就可以避免灰浆收缩引起的形状变化和附加内力，也避免因灰浆强度低于块石强度导致桥梁承载能力降低；但是，这就要求每一块石的镌刻误差要控制在 3mm 左右。作者估算，主拱圈承受全桥自重(不含桥台)的安全系数高达 38.2。



图 4 拱脚附近的主拱圈



图 5 下层拱圈 28 条拱券并列布置，上层拱圈(含 6 条钩石)及小拱支墩块石错列布置

下层拱圈的 28 条拱券相对独立同时并列布置，这主要是考虑到满孔施工支架容易受到每年汛期洪水的影响。在多年的施工中，每年只搭建较窄的满孔支架，相对独立地施工两三条拱券；在洪水到来之前拆除支架；枯水时再搭建相邻支架，施工相邻的两三条拱券。这也使得部分支架材料可以重复使用。这种做法非常便于施工，也便于日后可以独立维修和更换每条拱券，但是整个下层拱圈的横向整体性相对较差。为此，采用 4 项辅助措施：

第一，上、下层拱圈块石横向错列布置。

上层拱圈块石与下层拱圈块石横向错列布置，上层拱圈块石对下层拱圈块石产生横向约束作用，也使上、下层拱圈形成整体。

第二，9根铁拉杆锚固。

靠近拱顶的上下层拱圈之间设置5根外部呈铆钉头形状的铁拉杆(主拱圈上的4个小拱顶部还各有1根，全桥共9根)，每根铁拉杆内部由多段杆采用钩和孔接长，达到所在位置的拱圈宽度，通过铆钉头端部铆住拱圈外侧。

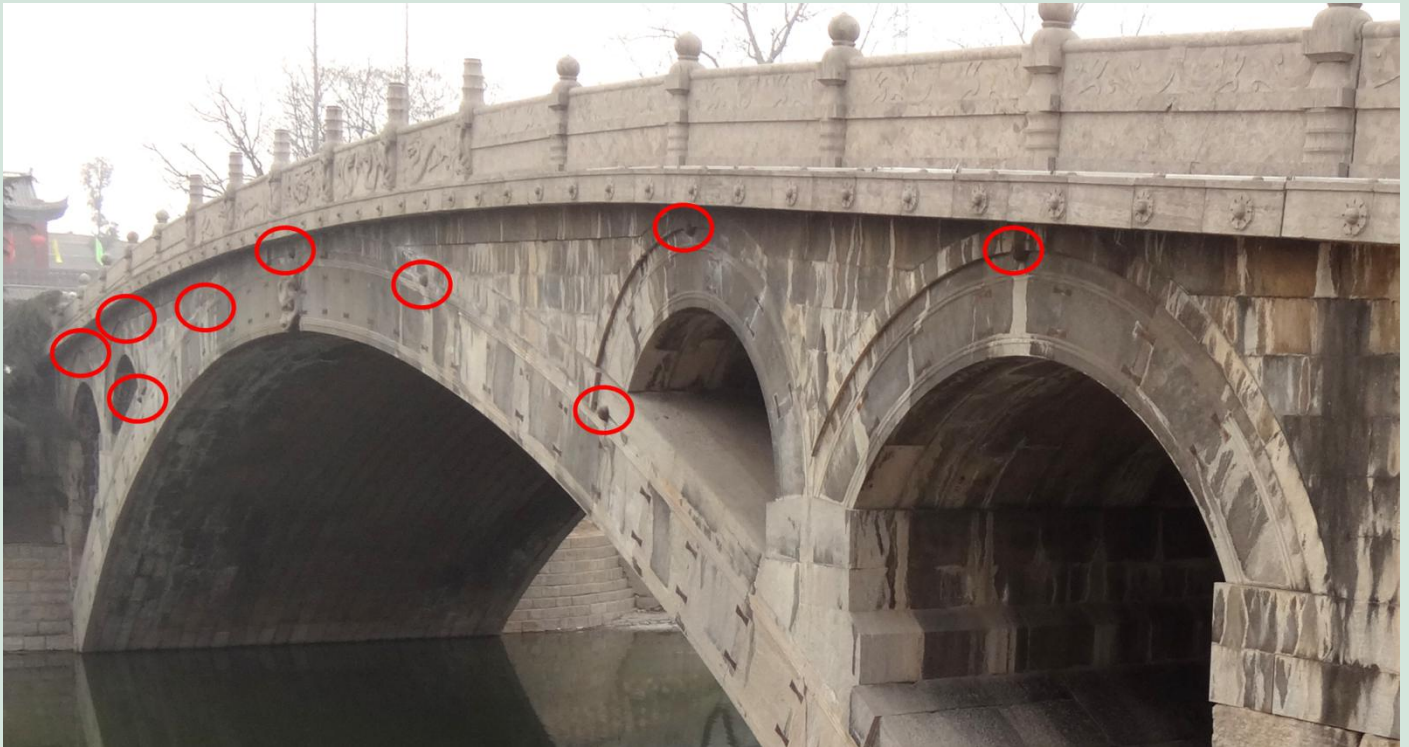


图6 主拱圈的5根和4小拱顶部各1根铆钉头铁拉杆(圆圈内)

第三，长条钩石钩住外侧下层拱券。

上层拱圈的外侧表面包含6道长条状钩石，每道钩石长约1.8m，连接5、6条下层拱券；外侧表面凸出约5cm，凸出部分再向下凸出约5cm，呈直钩状，卡住下层拱券外侧块石的上缘。



图7 上层拱圈设置6道长条状钩石(圆圈内)

第四，拱圈上窄下宽形成稳定结构。

拱圈下部宽度比顶部宽度大0.6m，横向呈“八”字形，一定程度让外侧拱圈下部在横向上支撑拱圈上部，阻止拱圈上部向外变形和分离。

主拱圈上面设置的 4 个小拱，其拱圈厚度虽小，但同样采用上下层拱、腰铁和铆钉头铁拉杆等做法，增强结构的整体性能。

在自然沙粘土上铺设多层条石，形成台阶状扩大基础，既承受桥梁的竖向荷载，也有利于减弱水流对基础和河床的冲刷。

主拱圈在拱脚处的水平角度约 42.67° ，这就意味着其向外水平推力比向下竖向压力还大 8.5%。这就是坦拱桥区别于陡拱桥的突出特点，也是坦拱桥建造困难和长久安全使用困难之所在。

为此，主拱圈外相对较大尺寸的桥台块石墙体及其中间填充土石，与其基础相连，体积和重量较大，能够有效地承担主拱圈 1200t 以上的水平推力。赵州桥千年不倒，也和这个能够抵抗巨大水平推力的“金刚”分不开。

三、精美的工程艺术作品和美名

赵州桥是以李春为首的一批桥梁工程师和工匠多年辛勤劳作的结晶。赵州桥是平坦的圆弧拱桥，整体造型优美；桥面宽敞、平缓；桥面护栏有精美浮雕；桥面留着“柴王爷推车压了一道沟”……赵州桥是一件精美的工程艺术作品。

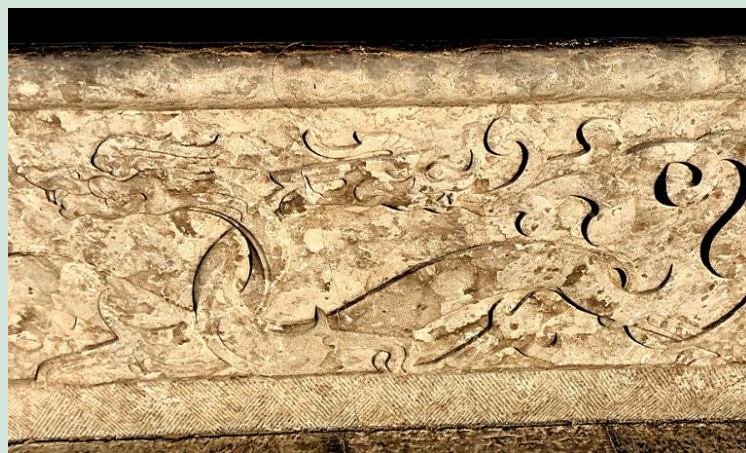




图7 桥面护栏上的浮雕



图8 桥面留着“柴王爷推车压下了一道沟”和“膝印”



图9 主拱圈和小拱圈连接细部



图 10 主拱圈顶部的“龙头”和桥面护栏外侧浮雕

赵州桥原来一直叫“大石桥”；建成 400 多年后，北宋宋哲宗赐名“安济桥”。

赵州桥也成为许多民间美好故事的载体。华北民间小调“小放牛”中有小姑娘回答牧童哥哥：

“赵州桥，鲁班爷修；

玉石栏杆圣人留。

张果老骑驴桥上走；

柴王爷推车压下了一道沟。”

1932 年，梁思成先生等考察、测量赵州桥，1934 年将研究报告发表在《中国营造学社汇刊》上，1938 年将相关内容发表在《铅笔画》杂志上，系统、全面地推介赵州桥。

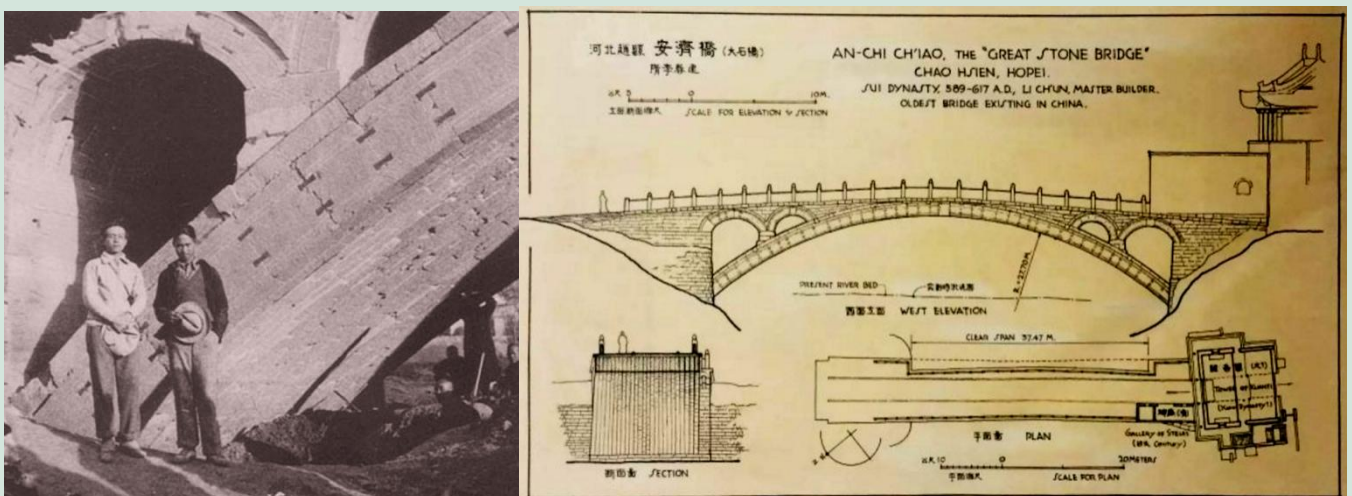


图 11 梁思成先生等考察、测量赵州桥和所绘的桥梁布置图

茅以升先生在 1962 年 3 月 4 日《人民日报》上发表“中国的石拱桥”一文，介绍了赵州桥等；后来的《赵州桥》课文改编之该文。

19 赵州桥

河北省赵县(xiàn)的汶(xiào)河上,有一座世界闻名的石拱桥,叫安济(jì)桥,又叫赵州桥。它是隋(suí)朝的石匠(jiàng)李春设计和参加建造的,到现在已经有一千四百多年了。

赵州桥非常雄伟。桥长五十多米,有九米多宽,中间行车马,两旁走人。这么长的桥,全部用石头砌(qì)成,下面没有桥墩(dūn),只有一个拱形的大桥洞,横(héng)跨在三十七米多宽的河面

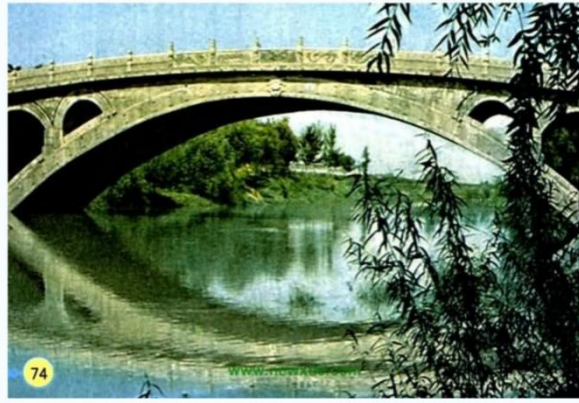


图 12 小学三年级语文课本第 19 课《赵州桥》(电子版)

赵州桥 1961 年被国务院列为第一批全国重点文物保护单位;1989 年被美国土木工程师学会(ASCE)认定为“国际土木工程历史名胜”(1991 年派人来华正式告知;中国迄今唯一得到认定的古建筑;其它国家包括巴拿马运河、艾菲尔铁塔、伦敦塔桥等)。

赵州桥后来被建了院围起来、保护起来、“供”起来,收门票每人 40 元……



图 13 赵州桥“大院”的院门



图 14 赵州桥“大院”照壁上刻着茅以升先生《中国石拱桥》文章的部分段落

四、1954 年桥梁大修

赵州桥经历了多次洪水、地震和战事，也有过多次维修，其中 1954 年 6 月至 1956 年 10 月的大修值得一提。大修内容主要有：

- 第一，重砌东端外侧 5 条下层拱券，更换其它拱券部分受损严重的块石；
- 第二，对 23 条原来下层拱券的间隙、裂缝压力注浆；
- 第三，在上下层拱圈之间增加粘接层；
- 第四，在桥面石板下面增设亚麻布与沥青防水层；
- 第五，重新镌刻制作安装部分护栏和桥面石板。

那次维修还从河中捞挖出不同年代坠落的石块并尽量加以利用；同时也初步探明桥梁基础形式；移开紧靠桥梁的桥门建筑；在旁边新建一座桥梁，承担日常交通，减少对原桥的负载。

维修花费 30 多万元，在那个年代算是花大钱了；维修极其认真、严格、精细，效果非常好。

在不同的历史时期使用先进的技术与材料维修桥梁的出发点是正确的，如在桥面石板下面增设防水层对桥梁的防水发挥了重要作用，其它维修措施也同样发挥了有效作用。



图 15 1954 年维修前的桥梁



图 16 重新雕刻制作部分护栏

五、总体现状良好

赵州桥 1956 年维修结束至今已有 60 多年。一方面，总体上维修效果非常好，另一方面，这些年得到善待：现有桥梁的总体状况良好，但也存在一些问题：桥面护栏的立柱与石板之间拼接缝明显增大，最大缝隙超过 20mm；少数桥面石板开裂、桥面护栏局部轻微外倾、桥面少数护栏石板上缘受拉开裂；下层拱圈少数块石错位凸出底面；桥面部分渗水至桥拱外侧表面；外侧拱圈表面轻度风化和局部损伤等。前两者的主要成因与外侧拱圈长期承受实体护栏较大荷载并出现微量不均匀变形(含地基与基础变形与沉降)有关。这些问题总体上不严重，短时间内不会危及桥梁安全，但仍需重视、加强观测。



图 17 桥面护栏的立柱与石板之间的拼接缝增大

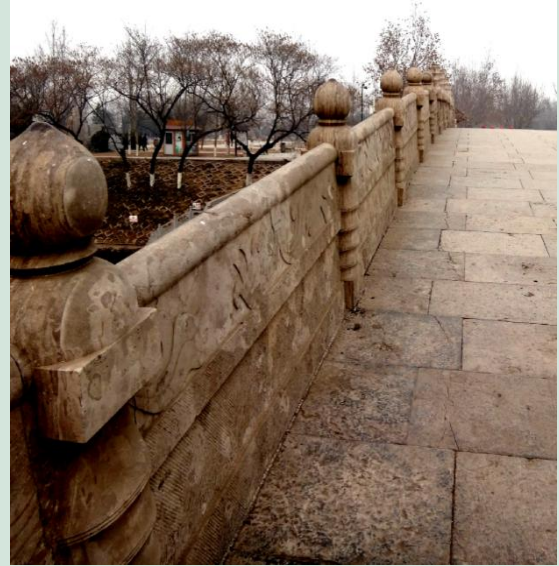




图 18 桥面石板少数开裂、桥面护栏局部轻微外倾、少数护栏石板上缘受拉开裂

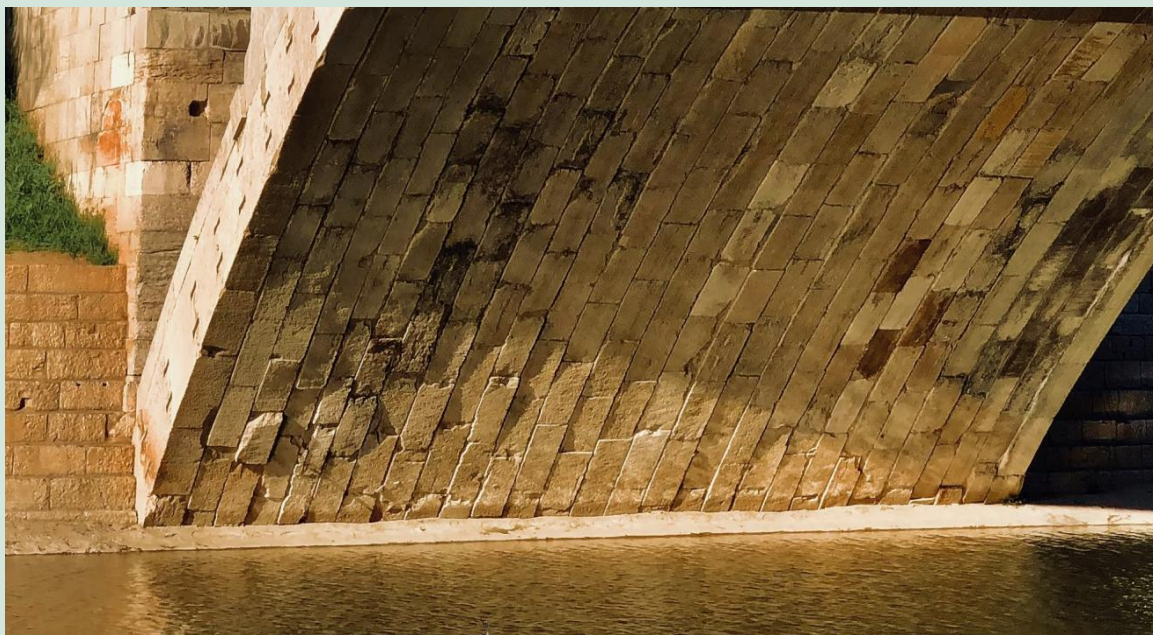


图 19 下层拱圈少数块石错位凸出底面



图 20 桥面部分渗水至桥拱外侧表面



图 21 外侧拱圈表面轻度风化和局部损伤

六、赵州桥激励着现代中国拱桥建设者继续前行

以赵州桥为杰出代表的我国古代拱桥技术曾经领先世界。赵州桥的成就更是激励着现代中国拱桥建设者继续前行，使我国现代拱桥继承和发扬古代拱桥技术传统并有所创新，其技术继续领先世界：2000 年山西晋城建成 146m 的世界最大跨度石拱桥，丹河新桥，几乎接近石拱桥的跨度极限；2003 年上海建成 550m 的世界第二跨度拱桥(建成时为世界第一)，卢浦大桥；2009 年重庆建成 552m 的世界最大跨度拱桥，朝天门长江大桥；2011 年南京建成两跨 336m 的世界最大跨度连跨拱桥，大胜关长江大桥(6 线轨道，用钢量近 8 万 t)；新的拱桥世界纪录 560m 的广西平南三桥已经开始建设……

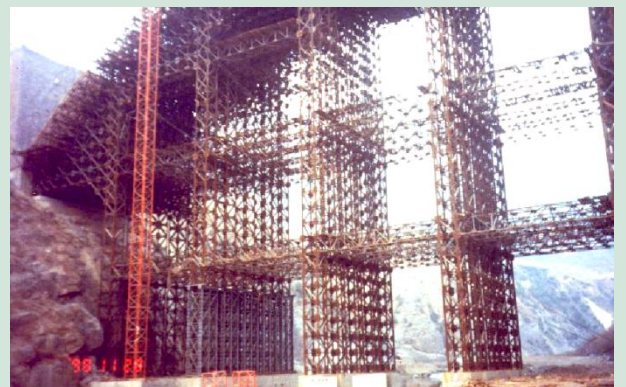


图 22 146m 跨度的丹河新桥和超过 70m 高的施工支架



图 23 550m 跨度的上海卢浦大桥



图 24 552m 跨度的重庆朝天门长江大桥



图 25 两主跨 336m 的南京大胜关长江大桥

作者说明：1 本文在学习借鉴多位前辈考证与论述基础上根据实地考察、研究考证和分析成稿；其中图 2、图 11 和图 12 来源于网络，图 15 和图 16 来源于《人民画报》，谨此一并鸣谢。2 本文主体内容在 2017 年“西南交大桥梁”微信公众号上发表；2018 年 5 月应赵县文化局郑永军先生、赵州桥科技馆姚义怀先生邀请再次考察赵州桥，近期应约根据后面的考察补充、修改少数文字、补充更换部分照片。3 感谢茅玉麟女士等相关人士提出的宝贵意见。

作者简介：郑凯锋，西南交通大学教授，桥梁专业博士，博士生导师；入选“全国百

千万人才工程”、国务院特殊津贴专家、英国南安普敦大学客座教授；获省部科技进步一等奖、中国铁道学会优秀论文一等奖、中国公路桥梁学会优秀论文奖等；参编《公路悬索桥设计规范》等；担任 40 多座大型、复杂桥梁设计与施工的技术顾问和咨询专家，考察 60 多个国家的著名桥梁和特殊结构桥梁；主要研究方向有大跨桥梁、钢桥、桥梁精细计算和仿真分析等。
